






Badania tribologiczne i biotribologiczne w Laboratorium Inżynierii Powierzchni i Tribologii Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Obróbki Plastycznej

Tribological and biotribological research in the Laboratory of Surface Engineering and Tribology of Łukasiewicz Research Network – Metal Forming Institute

(1) Tomasz Wiśniewski¹  (2) Joanna Sulej-Chojnacka^{1*}  (3) Volf Leshchynsky¹  (4) Marcin Lijewski¹  (5) Łukasz Łapaj² 

¹ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

² Uniwersytet medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, Wydział Lekarski II, Klinika Ortopedii Ogólnej, Onkologicznej i Traumatologii, ul. Bukowska 70, 60-812 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 17.06.2019

Recenzja: 24.06.2019

Akceptacja: 30.08.2019

Wkład autorów

(1–2) Koncepcja, realizacja prac badawczych, interpretacja wyników badań

(3) Koncepcja, nadzór merytoryczny nad realizacją pracy, interpretacja wyników badań

(4–5) Realizacja prac badawczych, interpretacja wyników badań

ORCID iD

(1) <https://orcid.org/0000-0002-8112-8967>

(2) <https://orcid.org/0000-0003-0158-7125>

(3) <https://orcid.org/0000-0003-3807-0701>

(4) <https://orcid.org/0000-0002-6838-2709>

(5) <https://orcid.org/0000-0002-5766-2924>

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań, które są efektem realizowanych w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Obróbki Plastycznej zarówno projektów krajowych, jak i międzynarodowych, dotyczących tematyki tribologicznej oraz biotribologicznej. Przedstawiono wyniki badań, których efektem jest opracowanie nowej generacji narzędzi kuźniczych (zaprojektowanie narzędzi do kucia na zimno z odpowiednio przygotowaną powierzchnią roboczą i opracowanie nowych wielowarstwowych, nanostrukturalnych powłok gradientowych) oraz rozwiązanie problemu wczesnego zużywania się części pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Dla elementów trących pracujących w wysokiej temperaturze opracowano rozwiązanie, które znalazło praktyczne zastosowanie w przemyśle w zakresie poprawy technologii smarowania. Opracowanie technologii wprowadzenia cząstek smarów stałych na powierzchnie współpracujących tribologicznie części pracujących w podwyższonych temperaturach stało się niezwykle istotne dla wielu gałęzi przemysłu, które spotykają się na co dzień z problemami wczesnego zużywania elementów współpracujących. W drugiej części pracy skupiono się na problemach biotribologicznych, gdzie głównym wyzwaniem jest wydłużenie trwałości endoprotez stawu biodrowego. W związku z tym prowadzono prace związane z dokładnym poznaniem procesu zużywania się endoprotez. Bardzo ważną kwestią stanowi również badanie właściwości tribologicznych nowych materiałów przeznaczonych na elementy endoprotez. Badania prowadzono na specjalnie do tego celu zaprojektowanym i zbudowanym symulatorze stawu biodrowego, który spełnia wymogi normy ISO.

Słowa kluczowe: tribologia, tarcie, narzędzia kuźnicze, endoproteza, testery tribologiczne

Article info

Received: 17.06.2019

Reviewed: 24.06.2019

Accepted: 30.08.2019

Authors' contribution

(1–2) Concept, implementation of research works, interpretation of research results

Abstract

This paper presents the results of research, which are the effect of national and international projects carried out at the Łukasiewicz Research Network – Metal Forming Institute, concerning both tribological and biotribological topics. The research results, the effect of which is the development of a new generation of forging tools (the design of cold forging tools with a properly prepared work surface and the development of new multilayered, nanostructured gradient coatings) and the solution to the problem of early wear of the parts working in difficult conditions are presented. For friction elements ope-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; e-mail: chojnacka@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; e-mail: chojnacka@inop.poznan.pl

- (3) *Concept, supervision over research work, interpretation of research results*
 (4–5) *Implementation of research works, interpretation of research results*

ORCID iDs

- (1) <https://orcid.org/0000-0002-8112-8967>
 (2) <https://orcid.org/0000-0003-0158-7125>
 (3) <https://orcid.org/0000-0003-3807-0701>
 (4) <https://orcid.org/0000-0002-6838-2709>
 (5) <https://orcid.org/0000-0002-5766-2924>

rating at high temperature, a solution has been developed that has found practical applications in the industry in the field of improving lubrication technology. The development of the technology of introducing solid lubricant particles onto the surfaces of tribologically cooperating parts operating at elevated temperatures has become extremely important for many industries that daily face problems with the early wear of cooperating elements. The second part of the work focuses on biotribological problems and the main challenge is to extend the durability of hip joint endoprostheses. In connection with this, work was carried out to thoroughly understand the process of endoprosthesis wear. Examination of the tribological properties of new materials intended for elements of endoprostheses is also a very important issue. The research was conducted on a specially designed and built hip joint simulator, which meets the requirements of the ISO standard.

Keywords: *tribology, friction, forging tools, endoprosthesis, tribological testers*

1. WPROWADZENIE

W ŁUKASIEWICZU – INOP w 2008 roku został utworzony Zakład Zaawansowanych Technologii Kształtowania (BS). Struktura organizacyjna Zakładu BS obejmuje 2 komórki: Pracownię Kształtowania Proszków Spiekanych oraz Laboratorium Inżynierii Powierzchni i Tribologii. Zakład BS aktywnie realizuje założenia statutowe Instytutu: prowadzi badania naukowe, prace rozwojowe i wdrożeniowe. Prowadzone w Zakładzie prace związane są z badaniami i analizą istniejących rozwiązań oraz nowych innowacyjnych rozwiązań materiałowych.

W Laboratorium Inżynierii Powierzchni i Tribologii prace ukierunkowane są na rozwiązywanie problemów związanych z destrukcją warstwy wierzchniej oraz ubytkiem masowym dwóch współpracujących ze sobą elementów. Laboratorium zajmuje się badaniami tribologicznymi materiałów stosowanych w budowie maszyn oraz materiałów biozgodnych przeznaczonych na elementy trące endoprotez. W wyposażenie laboratorium stanowią unikalne w skali kraju urządzenia badawcze m.in. testery tribologiczne oraz symulatory ruchu układu kostno-stawowego człowieka. Laboratorium Inżynierii Powierzchni i Tribologii jest w pełni profesjonalnym partnerem dla środowiska gospodarczego, z którym prowadzi aktywną współpracę i w znaczący sposób odpowiada na wymagania stawiane ze strony przemysłu. Laboratorium w dużej mierze znajduje kierunki aplikacji i wdro-

1. INTRODUCTION

At ŁUKASIEWICZ – INOP in 2008, the Department of Advanced Forming Technologies (BS) was established. The BS organizational structure includes 2 cells: Sintered Powders Shaping Workshop, and the Surface and Tribology Engineering Laboratory. The BS Department actively implements the statutory assumptions of the Institute: it conducts research, development and implementation works. The works carried out at the department are related to research and analysis of existing solutions and new innovative material solutions.

In the Surface and Tribology Engineering Laboratory, works are aimed at solving problems related to the destruction of the surface layer and mass loss of the two cooperating elements. The laboratory deals with tribological research of materials used in the construction of machines and biocompatible materials intended for friction elements of endoprostheses. The laboratory equipment is unique on the domestic scale of research devices, among others tribological testers as well as movement simulators of the human osteoarticular system. The Surface and Tribology Engineering Laboratory is a fully professional partner for the economic environment with which it conducts an active cooperation, and responds to the requirements of the industry in a significant way. The laboratory to a great extent finds directions to apply and implement

żeń wyników prowadzonych prac naukowych do praktyki przemysłowej.

Upowszechnienie oraz wdrożenie do praktyki przemysłowej wyników prac badawczo-rozwojowych jest niezbędnym narzędziem do tworzenia gospodarki opartej na wiedzy. Innowacyjna gospodarka wręcz wymusza zdobywanie i wykorzystanie posiadanej wiedzy do opracowania i wdrażania nowych materiałów i nowych technologii na rzecz zrównoważonego rozwoju.

W obecnych czasach w dobie kryzysu ekonomicznego, energetycznego i ekologicznego przedsiębiorstwa na całym świecie przeżywają okres zmian. Muszą stawić czoła presji innowacji i globalnym naciskom na redukcję kosztów i stale śledzić trendy w branży. Obecnie wymaga się, aby maszyny i urządzenia wykazywały maksymalną sprawność, niezawodność i trwałość, co wiąże się z ograniczeniem kosztów produkcji, wydłużeniem bezawaryjnego czasu pracy urządzenia. Aby spełnić tak wysokie wymagania, należy rozwiązać m.in. problemy związane ze zużyciem współpracujących par kinematycznych, w których pod wpływem tarcia zachodzą głównie procesy zużycia tribologicznego, których skutkiem są straty energetyczne oraz częste awarie.

Całościowe prace badawcze w znaczący sposób wpływają na podniesienie innowacyjności wytwarzanych produktów oraz ułatwiają przemysłowi absorpcję nowych rozwiązań technologicznych, które będą wyznacznikiem innowacyjności. Szereg prowadzonych badań naukowych prowadzi do rozwoju wielu dziedzin naukowych m.in. takich, jak: inżynieria materiałowa, tribologia i nanotechnologia. Innowacyjna gospodarka wymusza wdrażanie nowych materiałów i technologii.

2. NOWA GENERACJA NARZĘDZI KUŹNICZYCH

W ŁUKASIEWICZU – INOP w latach 2009–2012 realizowano projekt w ramach programu Eurostars „Nowa generacja narzędzi kuźniczych”. W projekcie uczestniczyły jednostki z Czech (JVST), Słowenii (GAZELA) oraz Niemiec (IfU Diagnostic Systems GmbH). Głównym celem

the results of its conducted research work in industrial practice.

Disseminating and implementing the results of research and development in industrial practice is an indispensable tool for creating a knowledge-based economy. An innovative economy even forces the acquisition and use of existing knowledge to develop and implement new materials and new technologies for sustainable development.

Nowadays, in the era of economic, energy and ecological crisis, companies around the world are undergoing a period of change. They have to face pressure of innovation and global pressure to reduce costs and constantly follow trends in the industry. At present, machines and devices are required to demonstrate maximum efficiency, reliability and durability, which is associated with reduced production costs, and extended failure-free operation of the device. In order to meet such high requirements, it is necessary to solve, among others, problems related to the wear of cooperating kinematic pairs that under the influence of friction are mainly tribological wear processes, which result in energy losses and frequent failures.

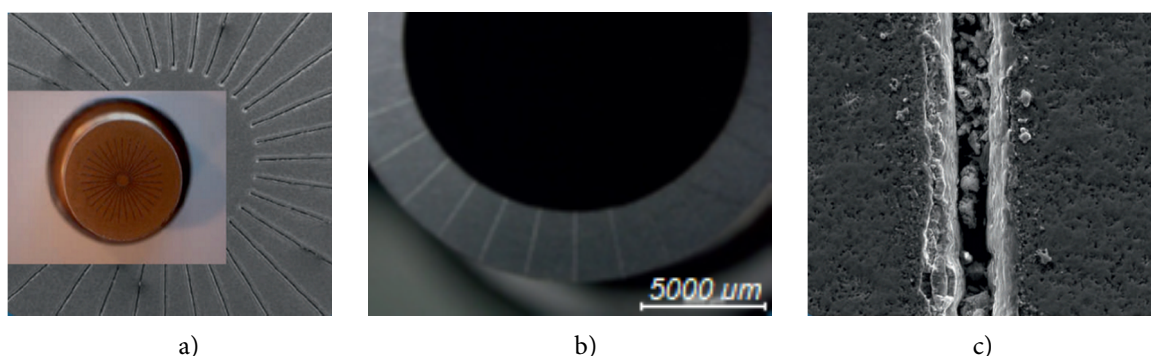
Comprehensive research works have a significant impact on increasing the innovation of manufactured products and help the industry absorb new technological solutions that will be a determinant of innovation. A number of scientific studies leads to the development of many scientific fields, among others, materials engineering, tribology and nanotechnology. An innovative economy enforces the implementation of new materials and technologies.

2. A NEW GENERATION OF FORGING TOOLS

At ŁUKASIEWICZ – INOP, in the years 2009–2012, a project under the Eurostars program “The New Generation of Forging Tools” was implemented. The project involved units from the Czech Republic (JVST), Slovenia (GAZELA) and Germany (IfU Diagnostic Systems GmbH). The

projektu było opracowanie nowej generacji narzędzi kuźniczych. Cel osiągnięto poprzez realizację dwóch głównych kierunków badawczych. Pierwszym z nich było zaprojektowanie narzędzi do kucia na zimno z odpowiednio przygotowaną powierzchnią roboczą wykroju (mikrokanalików) dla właściwego osadzania warstwy wierzchniej (rys. 1), natomiast drugim było opracowanie nowych wielowarstwowych, nanostrukturalnych powłok gradientowych. W ramach projektu opracowano innowacyjną technologię wykonania narzędzi, która polegała na wykonaniu mikrokanalików (rowków) oraz osadzeniu w nich smarów stałych o strukturze nanometrycznej. Opracowaną technologię weryfikowano podczas testów tribologicznych przeprowadzanych w układzie kulka-tarcza, których celem było określenie najbardziej optymalnego rozmieszczenia kanalików, ich kształtu oraz rozmiaru. Implementacja grafenopodobnych nanocząstek smarów stałych (MoS_2 i WS_2) w mikrokanalikach powodowała powolne uwalnianie cząstek smarów, a tym samym na zmniejszenie współczynnika tarcia oraz zużycia materiału.

main goal of the project was to develop a new generation of forging tools. The goal was achieved through the implementation of two main research directions. The first of these was to design cold forging tools with a specially prepared working surface (microchannels) for proper deposition of the surface layer (Fig. 1), while the second was the development of new multilayer, nanostructured gradient coatings. As part of the project, innovative tool making technology was developed, which consisted in making microchannels (grooves) and solid lubricants with a nanometric structure embedded in them. The developed technology was verified during tribological tests carried out in a ball-on-disc system, the aim of which was to determine the most optimal distribution of channels, their shape and size. Implementing graphene-like solid lubricant nanoparticles (MoS_2 and WS_2) in the microchannels resulted in the slow release of lubricant particles, thereby reducing the coefficient of friction and material wear.



Rys. 1. Powierzchnia a) robocza stempla, b) matrycy z mikrokanalikami oraz c) struktura mikrokanalika wytworzonego przez laser włóknowy

Fig. 1. Surface a) working punch, b) die with microchannels, and c) microchannel structure made by fiber laser

Modyfikację warstw wierzchnich narzędzi przeprowadzono poprzez osadzanie wielowarstwowych powłok o strukturze nanometrycznej. W ramach projektu wykonano powłoki typu nACo-H, nACo-P, TiAlN, S-TiN, TiN-MP, TiN-MP-makro metodą PVD. Uzyskane powłoki poddano badaniom strukturalnym oraz tribologicznym, w wyniku których otrzymano zmniejszenie wartości współczynnika tarcia oraz zwiększenie trwałości narzędzi.

Modification of the surface layers of the tools was carried out by depositing multilayer coatings with a nanometric structure. As part of the project, nACo-H, nACo-P, TiAlN, S-TiN, TiN-MP and TiN-MP-macro coatings were prepared using the PVD method. The obtained coatings were subjected to structural and tribological tests, as a result of which a reduction in the coefficient of friction and an increase in the durability of the tools were obtained.

Wdrożenie wyników nastąpiło głównie u koordynatora projektu, czyli w firmie JVST z Czech, natomiast sposób przygotowania powierzchni, a także zastosowany smar oraz opracowana przez firmę Gazela powłoka PVD pozwoliła na zwiększenie trwałości narzędzi. Metodę tę stosuje również ŁUKASIEWICZ – INOP przy wytwarzaniu wyrobów proszkowych swoich serii pilotażowych dla firmy ZKO Praha oraz TKZ Polna. Wartością dodaną projektu były 3 zgłoszenia patentowe, na które otrzymano patenty. Jednocześnie, w czasopiśmie ŁUKASIEWICZA – INOP „Obróbka Plastyczna Metali”, opracowano zalecenia technologiczne opublikowane pt. „Modyfikacja narzędzi kuźniczych za pomocą nano i mikrocząstek smaru stałego oraz twarde powłoki PVD.”

3. CZĘŚCI PRACUJĄCE W TRUDNYCH WARTUNKACH EKSPLOATACYJNYCH

Kolejny projekt realizowano w latach 2013–2015 pt. „Wprowadzanie cząstek smarów stałych na powierzchnie współpracujących tribologicznie części pracujących w podwyższonych temperaturach” w ramach 7PR. Projekt niezwykle istotny dla wielu sektorów przemysłowych, które borykają się z problemami wczesnego zużycia elementów pracujących. Celem ŁUKASIEWICZA – INOP było zapewnienie uczestniczącym w projekcie małym i średnim przedsiębiorstwom z branży maszyn, urządzeń czy elementów pracujących w wysokiej temperaturze, nowych technologii umożliwiających pracę w warunkach tarcia suchego. Gdy elementy trące pracują w wysokiej temperaturze, tradycyjne środki smarujące często tracą swoje praktyczne znaczenie. Dlatego też niezwykle ważne było opracowanie nowych rozwiązań znajdujących praktyczne zastosowanie w przemyśle w zakresie poprawy technologii smarowania.

W ramach prowadzonych prac przeprowadzono analizę i klasyfikację części produkowanych przez małe i średnie przedsiębiorstwa (na przykładzie partnera projektu firmy J-VST), które pracują w trudnych warunkach eksploatacyjnych, związanych z tarcieniem i zużyciem. Przykłady elementów części maszyn pracujących

Implementation of the results took place mainly at the project coordinator's facilities, i.e. in the JVST company from the Czech Republic, while the method of surface preparation as well as the applied lubricant and the PVD coating developed by Gazela enabled an increased durability of the tools. This method is also used by ŁUKASIEWICZ – INOP in the production of powder products for its pilot series for ZKO Praha and TKZ Polna. The added value of the project was 3 patent applications, for which patents were obtained. At the same time, technological recommendations were published in the ŁUKASIEWICZ – INOP journal “Metal Forming”, entitled “Modification of forging tools with nano and microparticles of solid lubricant and hard PVD coatings”.

3. PARTS WORKING IN DIFFICULT OPERATING CONDITIONS

Another project was implemented in 2013–2015 entitled “Introduction of solid lubricant particles to surfaces of tribologically working parts operating at elevated temperatures” under FP7. The project is extremely important for many industrial sectors that are struggling with the problems of early wear of working elements. The aim of ŁUKASIEWICZ – INOP was to provide small and medium-sized enterprises from the machine industry participating in the project, devices or components operating at high temperature, and new technologies enabling work in conditions of dry friction. When friction elements work at high temperatures, traditional lubricants often lose their practical meaning. Therefore, it was extremely important to develop new solutions that are applied in industry to improve lubrication technology.





As part of the conducted work, analysis and classification of parts manufactured by small and medium-sized enterprises (on the example of the project partner company JVST) were carried out, which work in difficult operating conditions related to friction and wear. Examples of

w trudnych warunkach eksploatacyjnych zestawiono w tab. 1.

elements of machine parts working in difficult operating conditions are listed in Tab. 1.

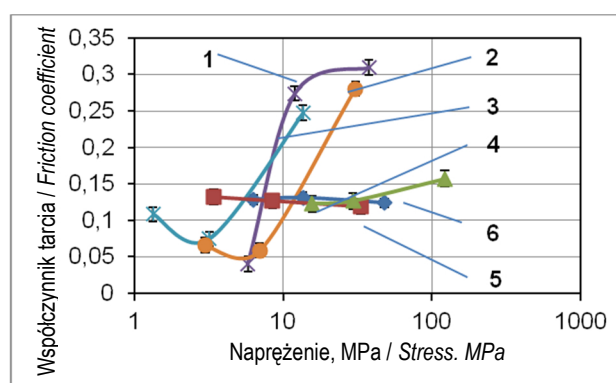
Tab. 1. Przykłady komponentów możliwych do produkcji przez J-VST pracujących w warunkach smarowania:
a) hydrodynamicznego, b) mieszanego, c) elasto-hydrodynamicznego, d) granicznego

*Tab. 1. Examples of JVST production components operating under lubrication conditions:
a) hydrodynamic, b) mixed, c) elasto-hydrodynamic, d) boundary*

a)	b)	c)	d)
			
Łożyska czopowe <i>Pivot bearing</i>	Tuleje łańcuchowe <i>Chain bushings</i>	Przenośniki z łożyskami kulkowymi <i>Conveyors with ball bearings</i>	Matryce do kucia <i>Forging dies</i>

Ponadto wykonano badanie mechanizmów zużycia i tarcia warstwy wierzchniej części wykonanych metodą metalurgii proszków modyfikowanych cząstkami HTSL. Przykład wyników badań tarcia dla różnych warunków obciążenia i naprężeń przedstawiono na rys. 2. Uzyskane wyniki dowodzą zmiany wartości współczynnika tarcia ze wzrostem średniej wartości naprężeń z udziałem smaru stałego MoS_2 i MoS_2 w zawieszynie oleju.

In addition, a study was carried out on the mechanisms of wear and friction of the surface layer of parts made by the metallurgy of powders modified with HTSL particles. An example of friction test results for various load and stress conditions is shown in Fig. 2. The obtained results prove the changes in the coefficient of friction with an increase in the mean stress value with the MoS_2 and MoS_2 solid lubricant in an oil suspension.



Rys. 2. Zależność współczynnika tarcia w funkcji naprężenia dla: 1, 2, 3 – smarowanie MoS_2 ; 4, 5, 6 – smarowanie kompozytem olej z MoS_2 (1 – prędkości pracy 0,194m/s; 2 – prędkości pracy 0,381m/s; 3 – prędkości pracy 0,571m/s; 4 – prędkości pracy 0,162m/s; 5 – prędkości pracy 0,320m/s; 6 – prędkości pracy 0,482m/s)

Fig. 2. Dependence of coefficient of friction as function of stress for: 1, 2, 3 – MoS_2 lubrication; 4, 5, 6 – lubrication with MoS_2 oil composite (1 – operating speed 0.194m/s; 2 – operating speed 0.381m/s; 3 – operating speed 0.571m/s; 4 – operating speed 0.162m/s; 5 – operating speed 0.320m/s; 6 – operating speed 0.482m/s)

Uzyskane wyniki wykazały zależność współczynnika tarcia od wartości naprężeń (nacisków)

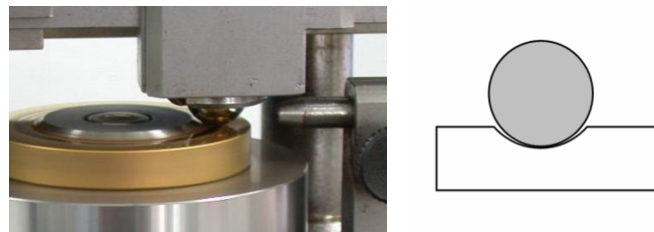
The obtained results showed the dependence of the coefficient of friction on the values of stress

i wartości prędkości pracy układu dla smarowania smarem stałym MoS_2 . Zachowanie przedstawionych wyników danej pary trącej opisane jest przez krzywe Stribeck, które pozwalają na różnicowanie rodzajów tarcia (graniczne, mieszane, hydrodynamiczne) w zależności od warunków tarcia. Wzrost nacisków prowadził do zmiany rodzaju smarowania, które wpływa na podwyższenie wartości współczynnika tarcia. Zwiększenie prędkości pozwala zmniejszyć wartość współczynnika tarcia. Zastosowanie kompozytu oleju ze smarem stałym znacznie zmienia charakter pracy układu pod względem tribologicznym, następuje stabilizacja wartości współczynnika tarcia. W związku z tym podjęto dalsze prace związane z zbadaniem właściwości tribologicznych smarów stałych przy pracy w wysokich temperaturach, w celu określenia możliwości zastosowania odpowiednich smarów stałych w węzłach tarcia. Badaniu poddano siedem rodzajów smarów stałych: CaF_2 , BaF_2 , h-NB, MoS_2 , WS_2 , MoS_2 +grafitowe (zawartość grafitu: 10, 25 i 20%) i WS_2 +grafit (zawartość grafitu: 10, 25 i 20%).

Badania tribologiczne w skojarzeniu *ball-on-disc* przeprowadzono w temperaturze pokojowej, przy pomocy testera tribologicznego T-10 oraz testera wysokotemperaturowego T-21.

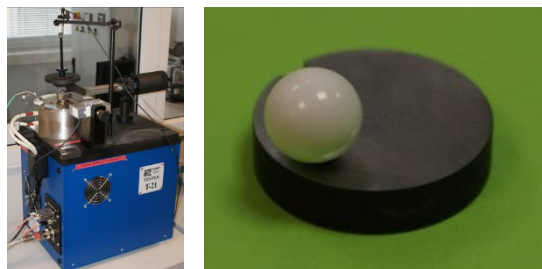
(pressure) and system operating speed values for MoS_2 solid lubrication. The behavior of the presented results of a given friction pair is described by Stribeck curves, which enable the differentiation of friction types (boundary, mixed, hydrodynamic) depending on the friction conditions. The increase in pressure led to a change in the type of lubrication, which affects the increase in the value of the coefficient of friction. Increasing the speed allows a reduction the coefficient of friction. Use of an oil with solid lubricant composite significantly changes the nature of the operation of the system in terms of tribological, followed by stabilization of the coefficient of friction. Therefore, further work was undertaken to examine the tribological properties of solid lubricants at high temperatures in order to determine the applicability of appropriate solid lubricants in friction couples. Seven types of solid lubricant were tested: CaF_2 , BaF_2 , h-NB, MoS_2 , WS_2 , MoS_2 + graphite (graphite content: 10, 25 and 20%) and WS_2 + graphite (graphite content: 10, 25 and 20%).

Tribological tests in the *ball-on-disc* system were carried out at room temperature using the T-10 tribological tester and the T-21 high temperature tester.



Rys. 3. Tester tribologiczny T-10

Fig. 3. T-10 tribological tester

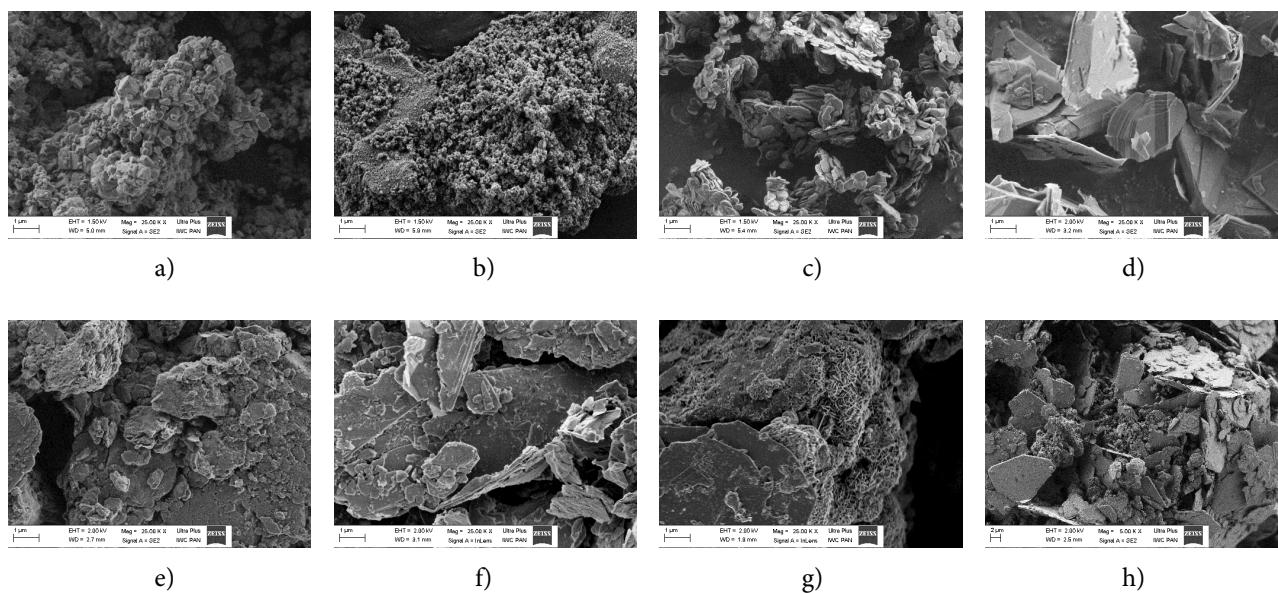


Rys. 4. Wysokotemperaturowy tester tribologiczny T-21

Fig. 4. T-21 high temperature tester

Urządzenia T-10 (rys. 3) i T-21 (rys. 4) przeznaczone są do oceny odporności na zużycie i wyznaczenie współczynnika tarcia dla dowolnego skojarzenia materiałowego, pracującego w ruchu ślizgowym, w zależności od temperatury, prędkości poślizgu i nacisków powierzchniowych. Skojarzenie składa się z nieruchomej kuli dociskanej do obracającej się z zadaną prędkością tarczy, która wykonana jest z badanego materiału. Węzeł tarcia umieszczony jest w izolowanej komorze zaopatrzonej w element grzewczy (T-21), pozwalający na podgrzewanie i utrzymywanie stałej temperatury we wnętrzu komory badawczej. Podczas realizacji badań użyto także wysokorozdzielczy mikroskop elektronowy Zeiss LEO1530-1FESEM/EDS/EBS. LEO 1530, a przykładowe obrazy SEM dla badanych smarów stałych przedstawiono na rys. 5, natomiast wynik badań tribologicznych poszczególnych rodzajów substancji smarujących pokazano na rys. 6.

The T-10 (Fig. 3) and T-21 (Fig. 4) devices are designed to assess the wear resistance and determine the coefficient of friction for any material system operating in sliding movement, depending on the temperature, sliding velocity and surface pressures. The system consists of a fixed ball pressed against a disc rotating at a preset speed, which is made of the material being tested. The friction couple is placed in an insulated chamber equipped with a heating element (T-21), allowing the heating and maintaining of a constant temperature inside the test chamber. During the research, a high-resolution electron microscope Zeiss LEO1530-1FESEM/EDS/EBS. LEO 1530 was also used, and examples of SEM micrographs for the tested solid experiments are shown in Fig. 5, while the result of tribological tests of particular types of lubricants is shown in Fig. 6.

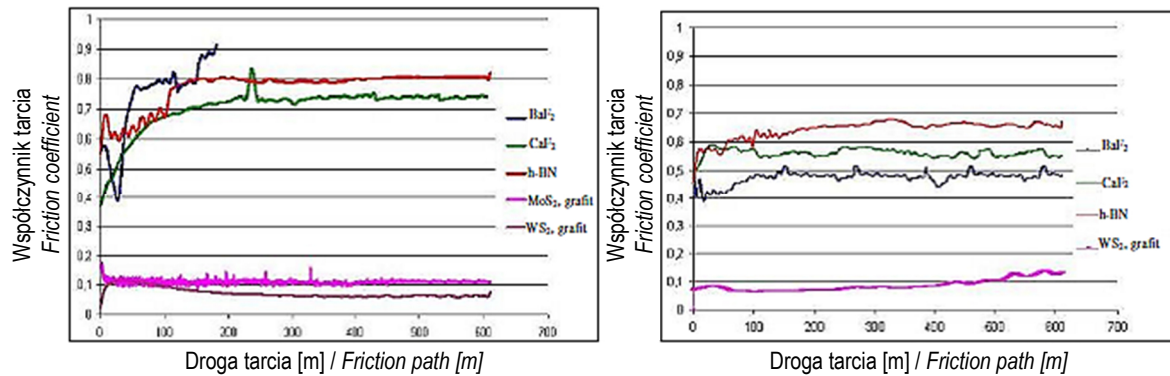


Rys. 5. Morfologia badanych smarów stałych: a) BaF_2 , b) CaF_2 , c) h-BN, d) grafit, e) MoS_2 po mieleniu i wyżarzeniu, f) MoS_2 produkcyjny, g) WS_2 po mieleniu i wyżarzeniu, h) WS_2 produkcyjny

Fig. 5. Morphology of tested solid lubricants: a) BaF_2 , b) CaF_2 , c) h-BN, d) graphite, e) MoS_2 after grinding and annealing, f) production MoS_2 , g) WS_2 after grinding and annealing, h) production WS_2

Analiza obrazów SEM pozwala stwierdzić obecność nano- i submikrocząstek w handlowych smarach stałych. Niektóre z nich zawierają dużą ilość nanocząstek (BaF_2 , CaF_2), podczas gdy w h-BN i MoS_2 szacuje się że udział nanocząstek wynosi 5–10% w objętości.

Analysis of the SEM micrographs allows the presence of nano- and submicroparticles in commercial solid lubricants to be determined. Some of them contain a large amount of nanoparticles (BaF_2 , CaF_2), while in h-BN and MoS_2 it is estimated that the proportion of nanoparticles is 5–10% in volume.



Rys. 6. Przykładowe zależności wartości współczynnika tarcia smarów od drogi tarcia dla temperatur: a) 25°C, b) 700°C

Fig. 6. Exemplary dependences of lubrication coefficient of friction on friction path for temperatures: a) 25°C, b) 700°C

Wartość współczynnika tarcia dla BaF₂, CaF₂, h-BN dla temperatury pokojowej jest stosunkowo wysoka (0,7–0,9), a w przypadku BaF₂ dochodzi do zatarcia. Dla smarów MoS₂ i WS₂ z dodatkiem grafitu współczynnik tarcia osiąga wartość maksymalną 0,1 z jednoczesnym stabilnym przebiegiem. Wzrost temperatury do 700°C spowodował obniżenie współczynnika tarcia dla BaF₂, CaF₂ i h-BN do wartości 0,5–0,7 [1]. Dla smarów stałych (MoS₂ i WS₂) z dodatkiem grafitu wzrost temperatury nie wpływa na zmianę wartości współczynnika tarcia. Na podstawie przeprowadzonych badań tribologicznych wysunięto wnioski, że MoS₂ i WS₂ z dodatkiem grafitu zapewniają doskonałe smarowanie w ekstremalnych warunkach obciążenia, oraz są odporne na utlenianie w wysokiej temperaturze. Dodanie grafitu do smarów stałych (MoS₂ i WS₂) zwiększa stabilność termiczną w wyższej temperaturze.

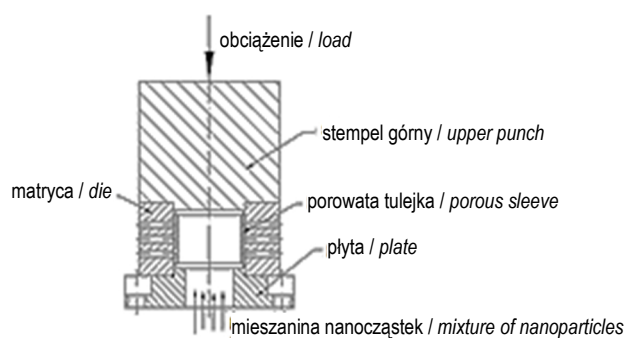
Na podstawie otrzymanych wyników wielkości współczynnika tarcia do dalszych badań tribologicznych wytypowano smary charakteryzujące się najlepszymi właściwościami tribologicznymi w podwyższonej temperaturze. Aby wydłużyć czas użytkowania elementów maszyn i urządzeń cząstki smarów stałych, zwykle dodawano do proszków metali przed procesem spiekania. Niemniej jednak, efektywność takiego procesu jest znikoma, gdyż następuje degradacja termiczna podczas spiekania detali. Dlatego też, dzięki współpracy szerokiego grona inżynierów materiałowców, fizyków i konstruktorów z ŁUKASIEWICZA – INOP, opracowano technologię impregnacji ciśnieniowej spieczonych

The value of the coefficient of friction for BaF₂, CaF₂, h-BN at room temperature is relatively high (0.7–0.9), and in the case of BaF₂, seizing occurs. For the lubricants MoS₂ and WS₂ with the addition of graphite, the coefficient of friction reaches a maximum value of 0.1 with a simultaneous stable course. The increase in temperature to 700°C caused a decrease in the coefficient of friction for BaF₂, CaF₂ and h-BN to the value of 0.5–0.7 [1]. For solid lubricants (MoS₂ and WS₂) with the addition of graphite, the increase in temperature does not affect the coefficient of friction. Based on the conducted tribological tests, conclusions were drawn that MoS₂ and WS₂ with the addition of graphite provide excellent lubrication under extreme load conditions, and are resistant to oxidation at high temperatures. Adding graphite to solid lubricants (MoS₂ and WS₂) increases their thermal stability at higher temperatures.

On the basis of the obtained results of the size of the coefficient of friction, lubricants characterized by the best tribological properties at elevated temperature were selected for further tribological tests. To extend the service life of machine parts and equipment, solid lubricant particles were usually added to the metal powders prior to the sintering process. Nevertheless, the efficiency of such a process is negligible as thermal degradation occurs during the sintering of elements. Therefore, thanks to the cooperation of a wide group of material engineers, physicists and constructors from ŁUKASIEWICZ – INOP, a technology for pressure impregnation of sintered powder parts was developed. The PC-2 pressure

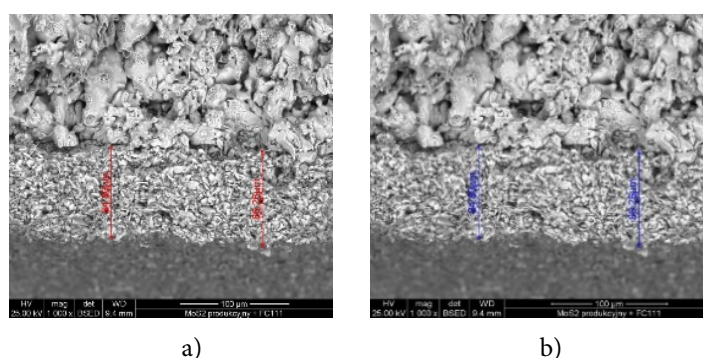
części proszkowych. Urządzenie do impregnacji ciśnieniowej PC-2 (rys. 7), które jest chronione patentem P.390100, składa się z gniazda impregnacyjnego, w którym umieszcza się modyfikowaną tulejkę układu podawania ciśnienia oraz układu dociskowego. Proces impregnacji polegał na wprowadzeniu w pory powierzchni trącej tulei (wewnętrznej warstwy wierzchniej tulei) oraz utworzeniu na jej powierzchni cienkiej warstwy z submikrometrycznych cząstek smarów stałych MoS_2 i WS_2 uzyskanych metodą *Rolling Cleavage Technology* (RCT). W wyniku działania ciśnienia wytworzonego w komorze modyfikującej mieszanina, na bazie płynu technologicznego FC111 o 5% zawartości smaru stałego MoS_2 lub WS_2 , infiltrowuje przez ścianę tulei. Cząstki smaru stałego MoS_2 lub WS_2 wnikają w pory tulei. W trakcie trwania procesu impregnacji powstaje cienka warstwa smaru stałego (rys. 8) [2].

impregnation device (Fig. 7), which is protected by patent P.390100, consists of an impregnation socket in which the modified sleeve, the pressure supply system and the pressure system are placed. The impregnation process consisted in introducing into the pores of the friction surface of the sleeve (the inner surface layer of the sleeve) and creating on its surface a thin layer of submicrometric particles of MoS_2 and WS_2 solid lubricants obtained by Rolling Cleavage Technology (RCT). As a result of the pressure generated in the modification chamber, the mixture, based on FC111 process fluid with 5% MoS_2 or WS_2 solid lubricants, infiltrates through the wall of the sleeve. MoS_2 or WS_2 solid lubricant particles penetrate into the pores of the sleeve. During the impregnation process, a thin layer of permanent lubricant is formed (Fig. 8) [2].



Rys. 7. Schemat przyrządu ciśnieniowego PC-2 do impregnacji

Fig. 7. Diagram of PC-2 pressure device for impregnation



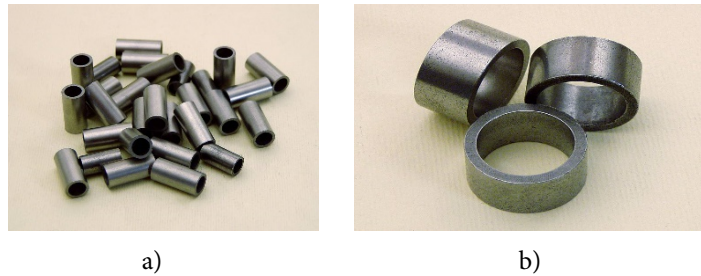
Rys. 8. Obrazy SEM zmodyfikowanej warstwy wierzchniej dla procesu ciśnieniowej impregnacji: a) 20 MPa, b) 40 MPa [2]

Fig. 8. SEM micrographs of modified top layer for pressure impregnation process: a) 20 MPa, b) 40 MPa [2]

Tak opracowana technologia impregnacji ciśnieniowej jest przeznaczona do osadzania mikro/nano-cząsteczek na powierzchniach ślizgowych, w celu osiągnięcia odpowiedniego sma-

The so-developed pressure impregnation technology is designed for micro / nanoparticle deposition on sliding surfaces, in order to achieve adequate lubrication, modification of the surface

rowania, modyfikacji warstwy wierzchniej rzeczywistych układów współpracujących. Badaniom eksperymentalnym poddano łożyska ślizgowe stosowane w układach wentylacyjnych samolotów, które poddano procesowi impregnacji ciśnieniowej cząstkami smarów stałych zostały przedstawione na rys. 9.

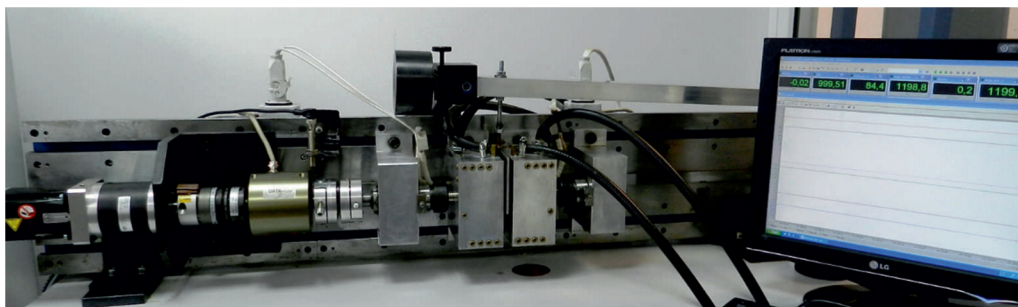


Rys. 9. Części łożysk ślizgowych: a) łańcuchowe, b) łożysko układu wentylacyjnego samolotu
Fig. 9. Parts of plain bearings: a) chain bushings, b) bearing of aircraft ventilation system

Łożyska ślizgowe ze zmodyfikowaną warstwą wierzchnią (nanocząstki smarów stałych) poddano badaniom na testerze tribologicznym TWT-500N, zaprojektowanym i wykonanym w ŁUKASIEWICZU – INOP. Tester pozwala na badanie układów w warunkach odzwierciedlających rzeczywiste parametry pracy. Badania pozwoliły na określenie parametrów tarcia i zużycia. Próbkę stanowi tuleja o $\phi 24$ i długości 30 mm. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 10.

layer of real cooperating systems. Experimental tests were carried out on plain bearings used in aircraft ventilation systems, which were subjected to a pressure impregnation process with particles of solid lubricants, are presented in Fig. 9.

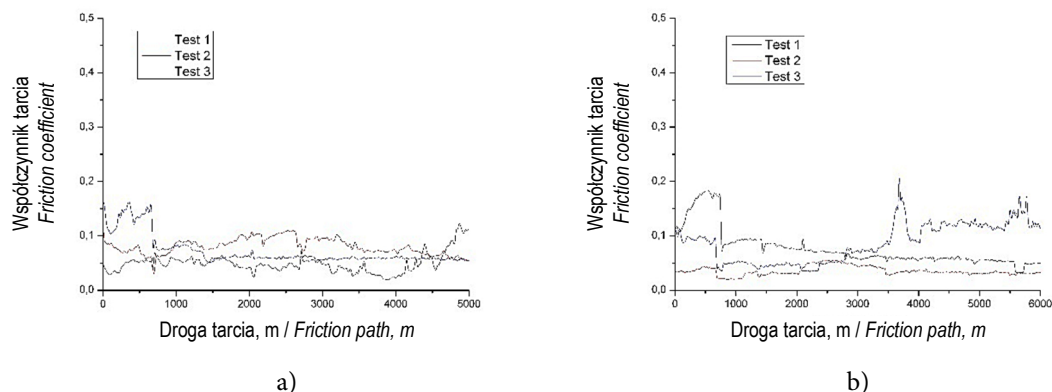
Plain bearings with a modified top layer (solid lubricant nanoparticles) were tested on a TWT-500N tribological tester, designed and made in ŁUKASIEWICZ – INOP. The tester enables the testing of systems in conditions reflecting the actual operating parameters. The research allowed the friction and wear parameters to be determined. The sample is a sleeve with a ϕ of 24 mm and a length of 30 mm. The layout of the test stand is shown in Fig. 10.



Rys. 10. Tester tribologiczny TWT-500N
Fig. 10. TWT-500N tribological tester

Tester TWT-500N pozwala na wykonanie badań tarciovo-zużyciowych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych: prędkość obrotowa do 120 obr./min, maksymalne obciążenie układu pary trącej – 500N, maksymalna temperatura 600°C.

The TWT-500N tester allows one to perform friction and wear tests under real operating conditions: rotational speed up to 120 rpm, maximum load of the friction pair system – 500N, maximum temperature 600°C.



Rys. 11. Zależność wartości współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia dla pary tribologicznej: tulejka ze stali 316L modyfikowanej cząstkami a) MoS_2 , badanej w temperaturze 300°C ; b) WS_2 , badanej w temperaturze 500°C

Fig. 11. Dependence of coefficient of friction value as function of friction path for tribological pair: sleeve made of 316L steel modified with particles a) MoS_2 , tested at 300°C ; b) WS_2 , tested at 500°C

Analiza uzyskanych wyników badań (rys. 11) pozwoliła stwierdzić, iż przebieg testów charakteryzował się dobrymi warunkami tarcia w temperaturze 300 i 500°C , przy zastosowaniu smaru stałego MoS_2 i WS_2 . Zmniejszenie oporów tarcia nastąpiło na skutek zjawisk zachodzących w cząsteczce smaru stałego [3]. Obserwowane obniżenie wartości współczynnika tarcia poprzez modyfikację powierzchni submikrometrycznymi cząstkami smaru stałego spowodowane było powstawaniem powłoki smarującej na granicy, uwalnianiem i doprowadzeniem nanocząstek z otwartych porów spieku na powierzchnie styku oraz efektem hydrodynamicznego smarowania na powierzchni styku [3].

W kolejnym etapie prac poddano testowaniu, współpracujące w warunkach przemysłowych, części samosmarujące. Wybrano trzy rodzaje narzędzi do kucia oraz łożyska ślizgowe. Zdjęcia wybranych elementów, wytypowanych do badań przemysłowych, przedstawiono na rys. 12.

Analysis of the obtained test results (Fig. 11) allowed the authors to state that the course of tests was characterized by good friction conditions at 300 and 500°C , with using MoS_2 and WS_2 solid lubricants. A reduction in frictional resistance occurred as a result of phenomena occurring in the solid lubricant molecule [3]. The observed decrease in the coefficient of friction by surface modification with submicrometric solid lubricant particles was caused by the formation of a lubricating coating on the border, the release and introduction of nanoparticles from open sinter pores on the contact surfaces and the effect of hydrodynamic lubrication on the contact surfaces [3].

In the next stage of the work, self-lubricating parts cooperating in industrial conditions were subjected to testing. Three types of forging tools and plain bearings were selected. Photographs of the chosen elements selected for industrial research are shown in Fig. 12.



Rys. 12. Elementy wytypowane do badań przemysłowych

Fig. 12. Elements selected for industrial research

Stwierdzono, że wytworzenie powłok składających się ze smarów cząstek stałych wpływa na wydłużenie czasu pracy systemu tribologicznego, a tym samym na korzyści ekonomiczne przedsiębiorstw, które je wykorzystują. Efektem modyfikacji warstwy wierzchniej jest wydłużenie czasu pracy określonych par tribologicznych oraz wpływ na koszty związane z wymianą, konserwacją, przestojami czy naprawą. Korzyści ekonomiczne wynikają z redukcji kosztów operacyjnych, w porównaniu do kosztów tradycyjnych metod produkcji części maszyn. Koszt pracy został zmniejszony, pomimo wyższej ceny produktu.

4. LABORATORIUM BIOTRIBOLOGICZNE

W ŁUKASIEWICZU – INOP przez wiele lat realizowano projekty krajowe i międzynarodowe o tematyce dotyczącej endoprotezoplastyki stawu biodrowego. We współpracy z Zespołem Ortopedyczno-Rehabilitacyjnym Szpitala Klinicznego im. Wiktora Degi w Poznaniu. Tylko taka współpraca daje szansę na pozyskanie ciekawych projektów, realizowanie ich i zakończenie wspólnym sukcesem. Na podstawie analizy, obecnie zagadnienie alloplastyki stawu biodrowego stanowi problem ogólnoswiatowy, bowiem z roku na rok przeprowadza się coraz więcej zabiegów i to dla coraz młodszej grupy wiekowej.

Od 2005 r. w Polsce obserwowany jest stały wzrost wartości świadczeń endoprotezoplastyki stawu biodrowego zrealizowanych przez świadczeniodawców w ramach umów zawartych z Narodowym Funduszem Zdrowia. W 2005 r. wykonano 26 091 endoprotezoplastyk, a w 2017 r. wykonano już 56 688. Według danych Zakładu Ubezpieczeń Społecznych w 2017 r. wykonano 52 154 endoprotezoplastyk pierwotnych stawu biodrowego i 4 534 endoprotezoplastyk rewizyjnych (w tym 663 operacji rewizyjnych bez wymiany elementów). Przedział wiekowy pacjentów wynosił 6–106 lat, a średni wiek operowanej kobiety wynosił 71 lat, mężczyzny – 65 lat. Wśród pacjentów, u których została wykonana endoprotezoplastyka stawu biodrowego, największy udział w ogólnej liczbie osób stanowiły osoby w wieku 60–69 lat. Następnym pod względem

It was found that the production of coatings consisting of solid-particle lubricants increases the working time of the tribological system, and thus the economic benefits of the enterprises that use them. The extended working time of certain tribological pairs and the impact on costs related to replacement, maintenance, downtime or repair are the effects of the surface layer modification. The economic benefits result from the reduction in operating costs compared to the costs of traditional production methods of machine parts. The cost of labor has been reduced, despite the higher price of the product.

4. BIOTRIBOLOGICAL LABORATORY

In ŁUKASIEWICZ – INOP, national and international projects on the subject of hip arthroplasty have been implemented for many years in cooperation with the Orthopedic-Rehabilitation Team of the Wiktor Dega Clinical Hospital in Poznań. Only such cooperation gives the chance to gain interesting projects, implement them and complete them with success. Based on the analysis, currently the problem of hip arthroplasty is a worldwide problem, because every year increasingly more treatments are carried out for an increasingly younger age group.

Since 2005, a steady increase in the value of hip arthroplasty services performed by healthcare providers under contracts concluded with the National Health Fund has been observed in Poland. In 2005, 26 091 arthroplasty procedures were performed and in 2017, already 56 688 were completed. According to data from the Social Insurance Institution, in 2017, 52 154 primary hip replacements and 4534 revision arthroplasty procedures were performed (including 663 revision surgeries without replacement of components). The age range of patients was 6 – 106 years, and the average age of the operated female was 71 years, male 65 years. Among patients who underwent hip arthroplasty, the largest share in the total number of people were those aged 60–69. The next in terms of numbers was the age range from 70 to 79 years. More than 58%

liczebności był przedział wiekowy od 70 do 79 lat. U osób z wymienionych grup wiekowych wykonano ponad 58% wszystkich endoprotezo-plastyk stawu biodrowego.

Jednym z głównych wyzwań inżynierii biomedycznej w dzisiejszych czasach jest wydłużenie trwałości endoprotez stawu biodrowego, która obecnie wynosi 10–15 lat. Obecnie najczęściej stosowanymi biomateriałami na elementy endoprotez biodra są: stopy na osnowie kobaltu (CoCrMo), ceramika (Al_2O_3 , ZrO_2) oraz polietylen o bardzo dużym ciężarze cząsteczkowym (PE-UHMW). Ważną cechą biomateriałów stosowanych na pary trące jest ich odporność na zużywanie tribologiczne. Istotne znaczenie ma również ilość i rodzaj powstających w wyniku użytkowania implantu produktów zużycia, które w postaci mikrocząstek: polietylenu, metalu lub ceramiki gromadzą się w przestrzeni okołowszczepowej implantu lub w postaci nanocząstek mogą migrować w organizmie, powodując odczyny toksyczne, uczuleniowe, a także często tworzenie się komórek rakowych [4].

5. TESTY TARCIOWO-ZUŻYCIOWE BIOMATERIAŁÓW

W ŁUKASIEWICZU – INOP (w latach 2013–2016) realizowano projekt badawczy Narodowego Centrum Nauki, SONATA pt. „Charakterystyka zmian parametrów mechanicznych i strukturalnych biomateriałów w przebiegu zużycia endoprotez stawu biodrowego”. Projekt realizowany był przez lekarzy ortopedów z Ortopedyczno-Rehabilitacyjnego Szpitala Klinicznego im. Wiktora Degi oraz naukowców z ŁUKASIEWICZA – INOP. Celem projektu było dokładne poznanie procesów, jakie zachodzą podczas zużywania się endoprotez; badania zmian zachodzących w materiałach, z których została wykonana endoproteza i określenie, jak bardzo negatywnie poszczególne rodzaje produktów zużycia oddziałują na tkanki wokół endoprotezy. W trakcie realizacji projektu w zespole dr n. med. Łukasza Łapaja opracowano i wdrożono oryginalną metodę izolacji cząstek polietylenu. Metoda otrzymała nagrodę im. Jacquesa Duparca w 2015 roku w Pradze; przyznawana jest

of all hip replacements were performed in people from the above-mentioned age groups.

One of the main challenges of biomedical engineering nowadays is to extend the durability of hip joint endoprostheses, which is currently 10–15 years. Presently, the most commonly used biomaterials for elements of hip endoprosthesis are: cobalt based alloys (CoCrMo), ceramics (Al_2O_3 , ZrO_2) and very high molecular weight polyethylene (UHMWPE). An important feature of biomaterials used for friction pairs is their resistance to tribological wear. The amount and type of wear products arising as a result of the use of the implant are also important, which in the form of microparticles: polyethylene, metal or ceramics, accumulate in the implant periphery or in the form of nanoparticles can migrate in the body causing toxic, allergic reactions, often causing the formation of cancer cells [4].

5. TESTS OF FRICTION AND WEAR OF BIOMATERIALS

At ŁUKASIEWICZ – INOP (in 2013–2016), the research project of the National Science Center, SONATA, was carried out. “Characteristics of changes in mechanical and structural parameters of biomaterials in the course of hip joint endoprosthesis wear”. The project was carried out by orthopedic doctors from the Wiktor Dega Orthopedic and Rehabilitation Clinical Hospital and scientists from ŁUKASIEWICZ – INOP. The aim of the project was to thoroughly learn the processes that occur during the wear of endoprostheses; studies of changes in the materials from which the endoprosthesis was made and to determine how negatively individual types of products affect the tissues around the endoprosthesis. During the implementation of the project, the original method of polyethylene particle insulation was developed and implemented in the team of Łukasz Łapaj MD–PhD. The method received the Jacques Duparc prize in 2015 in Prague; it was awarded the best scientific research pre-

za najlepsze badania naukowe prezentowane w trakcie kongresu Europejskiej Federacji Narodowych Towarzystw Ortopedycznych i Traumatologicznych (EFORT). Można nadmienić, że w wieloletniej historii kongresów EFORT nagrodę im. Jacquesa Duparca dotychczas tylko raz przyznano ortopedom z Polski.

Badania wykazały, że w trakcie eksploatacji endoprotez stawu biodrowego dochodzi do pogorszenia właściwości tribologicznych, mechanicznych i strukturalnych materiałów stosowanych do implantów. W miarę upływu czasu od implantacji endoprotezy następuje pogorszenie właściwości niektórych rodzajów polietylenu, co negatywnie wpływa na tarcie i przyspiesza zużycie endoprotezy. W endoprotezach o artykulacji typu metal-metal występują zarysowania powierzchni trących, co powoduje zwiększoną emisję produktów zużycia. Z podobnym zjawiskiem mamy do czynienia w implantach metalowych pokrywanymi powłokami np. azotkiem tytanu. W warunkach *in vivo* najbardziej odporne na zużycie są implanty wykonane z materiałów ceramicznych.

Badania mikroskopowe i analiza strukturalna produktów zużycia wykazały, że najbardziej niekorzystne jest uwalnianie produktów zużycia polietylenu i stopów metali. Wszystkie produkty zużycia wywołują wydzielanie przez tkanki wokół endoprotezy białek, które powodują niszczenie kości wokół implantu. Natomiast relatywnie najmniejszą aktywnością cechują się produkty zużycia uwalniane przez artykulacje typu ceramika-ceramika.

W jednym z realizowanych zadań przeprowadzono badania tarciovo-zużyciowe biomateriałów stosowanych na endoprotezy stawu biodrowego, a jednym z kierunków badań były badania porównawcze polietylenów. Materiał badany, trzpień o średnicy 9 mm (rys. 13), stanowił polietylen o ultrawysokiej masie cząsteczkowej PE-UHMW oraz PE-UHMW modyfikowany witaminą E, materiał przeciwpróbki (płytki) stanowił stop CoCrMo. Powierzchnie par trących przygotowane zostały zgodnie z normą ASTM F732 [5]. Badania tarciovo-zużyciowe prowadzone były w medium smarującym, które (zgodnie z normą ISO 14242 [6]), stanowiła surowica bydlęca rozcieńczona wodą dejonizowaną

sented during the congress of the European Federation of National Orthopedic and Traumatological Societies (EFORT). It can be mentioned that in the long-standing history of EFORT congresses, the Jacques Duparc prize has only once been awarded to orthopedists from Poland.

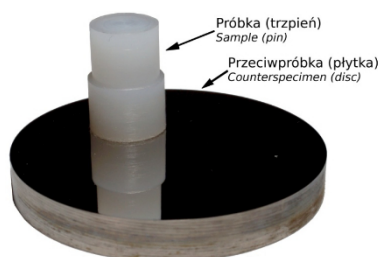
Studies have shown that during the operation of hip joint endoprostheses, the tribological, mechanical and structural properties of the materials used for implants deteriorate. Over time, after implantation of the endoprosthesis, the properties of some types of polyethylene deteriorate, which negatively affects the friction and accelerates the wear of the endoprosthesis. In metal-metal articulation endoprostheses scratches on the friction surfaces occur, which results in increased emission of wear products. A similar phenomenon occurs in metal implants with coatings, e.g. with titanium nitride. In vivo, implants made of ceramic materials are the most resistant to wear.

Microscopic examination and structural analysis of the wear products have shown that the most unfavorable is the release of polyethylene and metal alloy wear products. All wear products cause the tissues around the endoprosthesis to release proteins that cause bone destruction around the implant. In contrast, the relatively smallest activity is characterized by wear products released by ceramic-ceramic articulations.

In one of the performed tasks, friction and wear tests of biomaterials used for hip joint endoprostheses were performed, and one of the directions of research was comparative studies of polyethylenes. The test material, 9 mm diameter pins (Fig. 13), constituted ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and UHMWPE modified with vitamin E, and the counterspecimen material (discs) was a CoCrMo alloy. The surfaces of the friction pairs were prepared in accordance with ASTM F732 [5]. The friction and wear tests were conducted in a lubricating medium, which (according to ISO 14242 [6]), was bovine serum diluted with deionized water to a protein concentration of 25 g/l, with the addi-

do stężenia białka wynoszącego 25 g/l, z dodatkiem azydku sodu oraz kwasu etylenodiaminotetraoctowego (EDTA), w celu zahamowania wzrostu bakterii oraz związania jonów wapnia.

tion of sodium azide and ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), in order to inhibit bacterial growth and the binding of calcium ions.

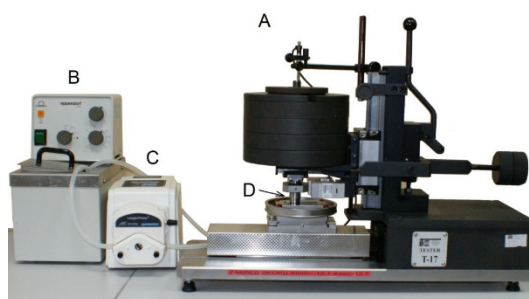


Rys. 13 Para trąca

Fig. 13. Friction pair

Testy tarciovo-zużyciowe przeprowadzono przy użyciu testera T-17 typu trzczeń-płytkę (rys. 14) przeznaczonego do badania materiałów na endoprotezy. Urządzenie wykorzystywane jest do wyznaczania charakterystyk tribologicznych skojarzeń materiałowych współpracujących ślizgowo w ruchu posuwisto-zwrotnym. Tester dodatkowo wyposażony został w pompkę perystaltyczną oraz w wannę grzewczą. Dzięki doposażeniu stanowisko badawcze pozwoliło na przeprowadzenie badań w surowicy bydlęcej podgrzanej do temperatury ciała człowieka. Badania przeprowadzone zostały zgodnie z normą ASTM F732 [5]: zastosowano amplitudę wynoszącą 12,5 mm i docisk 200 N, częstotliwość ruchu wynosiła $1 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$. Test prowadzono w temperaturze $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Ilość cykli wynosiła 1 mln. W czasie trwania testów rejestrowano: liczbę cykli, siłę tarcia, zużycie liniowe oraz temperaturę medium smarującego.

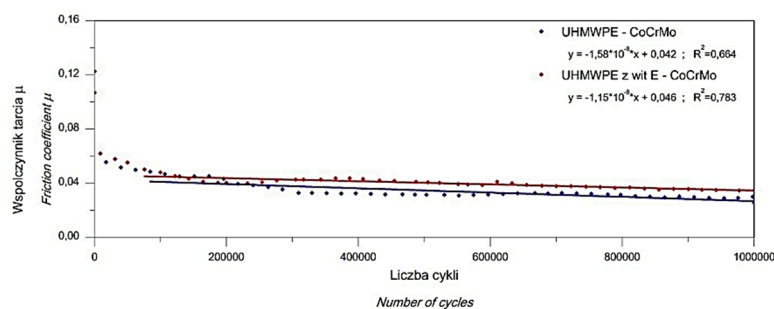
The friction and wear tests were carried out using a T-17 type pin-disc tester (Fig. 14) intended for testing materials for endoprostheses. The device is used to determine the tribological characteristics of material combinations articulating in reciprocating motion. The tester is additionally equipped with a peristaltic pump and a heating bath. Thanks to retrofitting, the test stand allowed tests to be carried out in bovine serum heated to the human body temperature. The tests were carried out in accordance with ASTM F732 [5]: an amplitude of 12.5 mm and a pressure of 200 N were applied, the frequency of movement was $1 \text{ Hz} \pm 0.1 \text{ Hz}$. The test was carried out at $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. The number of cycles was 1 million. During the tests, the number of cycles, friction, linear wear and temperature of the lubricating medium were recorded.



Rys. 14. Stanowisko badawcze: A – tester tarciovo-zużyciowy T-17, B – wanna grzewcza, C – pompka perystaltyczna, D – gniazdo mocowania próbki i przeciwp próbki [6]

Fig. 14. Test stand: A – friction and wear tester T-17, B – heating bath, C – peristaltic pump, D – sample and counter specimen mounting socket [6]

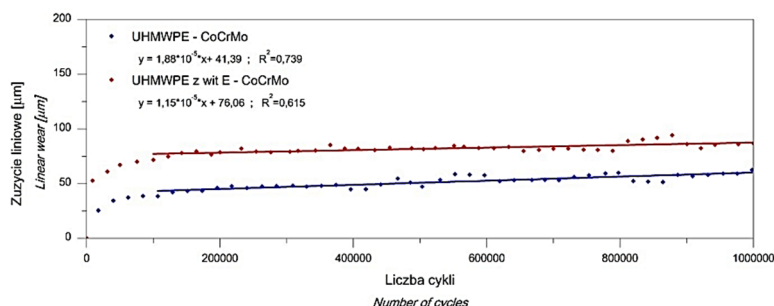
Wyznaczono średnie wartości współczynnika tarcia w funkcji liczby cykli (rys. 15). Dla poszczególnych par trących pokazanych na rys. 15 w pierwszej fazie testu nastąpił spadek współczynnika tarcia (ok. 100 000 cykli) dla obu par trących. Jest to spowodowane dotarciem się współpracujących powierzchni. Następnie wartość współczynnika tarcia stabilizuje się i dla obu analizowanych przypadków utrzymywała w przedziale 0,03–0,04. Współczynnik tarcia pary trącej PE-UHMW modyfikowany witaminą E i stopu CoCrMo wykazuje nieznacznie większą wartość w przebiegu całego testu.



Rys. 15. Zmiany współczynnika tarcia w funkcji liczby cykli dla badanych par trących [7]

Fig. 15. Changes in coefficient of friction as function of number of cycles for tested friction pairs [7]

Na rys. 16 przedstawiono zależność średniego zużycia liniowego wyznaczonego na podstawie testów tarciovo-zużyciowych w funkcji liczby cykli. Intensywność zużywania się materiału charakteryzowana jest poprzez nachylenie linii trendu wyznaczonej dla badanych skojarzeń. Im nachylenie jest mniejsze, tym mniejsza jest intensywność zużywania się materiałów. Z przebiegu zmian wynika, że intensywność zużywania pary PE-UHMW – CoCrMo była większa ($a = 1,88$) niż dla pary trącej modyfikowany witaminą E PE-UHMW – CoCrMo ($a = 1,15$).



Rys. 16 Zużycie liniowe w funkcji liczby cykli dla badanych par trących [7]

Fig. 16. Linear wear as function of number of cycles for tested friction pairs [7]

The mean values of the coefficient of friction as a function of the number of cycles were determined (Fig. 15). For the individual friction pairs shown in Fig. 15, the coefficient of friction dropped in the first test phase (about 100,000 cycles) for both friction pairs. This is due to the run in of the cooperating surfaces. Next, the coefficient of friction value stabilizes and in both analyzed cases it remained in the range of 0.03–0.04. The coefficient of friction of the UHMWPE modified with vitamin E and CoCrMo alloy friction pair shows a slightly higher value during the whole test.

Fig. 16 shows the dependence of the average linear wear determined on the basis of the friction and wear tests as a function of the number of cycles. The intensity of material wear is characterized by the slope of the trend line determined for the tested combinations. The lower the slope, the lower the intensity of material wear. The course of changes shows that the intensity of the UHMWPE – CoCrMo pair wear was higher ($a = 1.88$) than for the friction pair UHMWPE modified with vitamin E – CoCrMo ($a = 1.15$).

Na podstawie uzyskanych wyników badań tarciowo-zużyciowych stwierdzono, że lepszymi właściwościami tribologicznymi charakteryzuje się para trąca PE-UHMW modyfikowany witaminą E – CoCrMo. Współczynnik tarcia obu par trących był porównywalny, jednak intensywność zużycia pary PE-UHMW – CoCrMo była większa niż PE-UHMW modyfikowana witaminą E – CoCrMo.

6. TESTY TRIBOKOROZYJNE W WARUNKACH FETTINGU

W latach 2014–2018 ŁUKASIEWICZ – INOP brał udział w realizacji międzynarodowego projektu o akronimie „HypOrth” w ramach siódmego programu ramowego, pt. „Nowe rozwiązania w opracowaniu hipoalergicznego materiału na implanty ortopedyczne: kroki ku spersonalizowanej medycynie”. Głównym celem projektu było opracowanie nowego, hipoalergicznego materiału przeznaczonego na elementy endoprotez układu kostno-stawowego. W skład konsorcjum oprócz ŁUKASIEWICZA – INOP wchodziło sześciu partnerów z Unii Europejskiej: Otto-von-Guericke-Universitaet Magdeburg, Tartu Ulikool, Research Centre for Natural Sciences Hungarian Academy of Sciences, Teknologisk Institut, Progenika Biopharma SA, GABO:mi Gesellschaft für Ablauforganisation: milliarium mbH & Co KG oraz szwajcarska firma produkująca implanty Mathys AG Bettlach.

Badania właściwości tribologicznych nowych materiałów przeznaczonych na elementy endoprotez muszą być poprzedzone szeregiem testów, którym poddaje się materiały referencyjne. Celem tych badań jest konieczność upewnienia się, że nowe materiały charakteryzują się m.in. porównywalną lub większą odpornością na zużycie tribologiczne w porównaniu do tych, które wykorzystywane są obecnie w praktyce klinicznej. Na podstawie konsultacji z przedstawicielami firmy Mathys AG wytypowano materiały referencyjne oraz zdefiniowano metodykę badań.

Realizowano prace mające na celu zbudowanie stanowiska do realizacji badań fretting-korozji, który stanowił tester tribologiczny T-17

On the basis of the obtained friction and wear test results, it was found that the UHMWPE modified with vitamin E – CoCrMo friction pair exhibits better tribological properties. The coefficient of friction of both friction pairs was comparable, however, the intensity of UHMWPE – CoCrMo pair wear was higher than that of UHMWPE modified with vitamin E - CoCrMo.

6. TRIBOCORROSION TESTS IN FRETTING CONDITIONS

In 2014–2018, ŁUKASIEWICZ – INOP took part in the execution of an international project with the acronym “HypOrth” under the 7FP, entitled “New solutions in the development of hypoallergenic material for orthopedic implants: steps towards personalized medicine”. The main goal of the project was to develop a new, hypoallergenic material for elements of osteoarticular system endoprostheses. Apart from ŁUKASIEWICZ – INOP, the consortium included six partners from the European Union: Otto-von-Guericke-Universitaet Magdeburg, Tartu Ulikool Research Center for Natural Sciences, Hungarian Academy of Sciences, Teknologisk Institut, Progenika Biopharma SA, GABO: mi Gesellschaft für Ablauforganisation: milliarium mbH & Co KG and a Swiss company that produces implants – Mathys AG Bettlach.

Tests of the tribological properties of new materials intended for elements of endoprostheses must be preceded by a series of tests that reference materials are subjected to. The purpose of these tests is to ensure that new materials are characterized, among others, by a comparable or higher resistance to tribological wear compared to those currently used in clinical practice. Based on consultations with representatives of Mathys AG, reference materials were selected and the research methodology was defined.

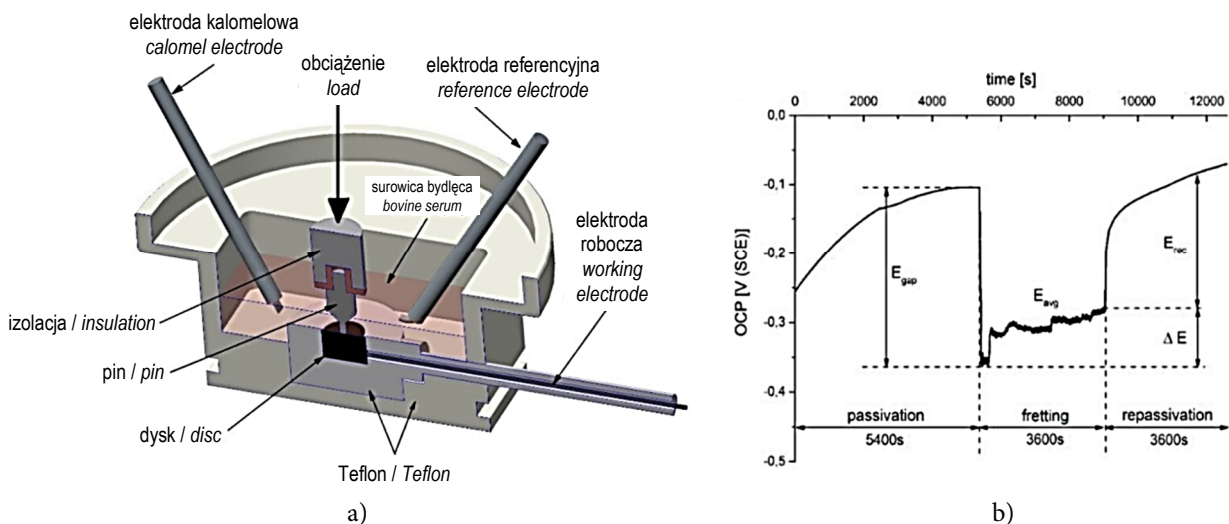
Work was carried out to build a stand to conduct fretting-corrosion tests, which was the T-17 tribological tester integrated with an SP-150

zintegrowany z potencjostatem SP-150. Elektrode badaną (roboczą) stanowiła próbka testowego biomateriału umieszczona w specjalnym gnieździe w taki sposób, aby powierzchnia wyeksponowana na działanie środowiska korozyjnego wynosiła 1 cm^2 . Jako elektrodę odniesienia (referencyjną) zastosowano nasyconą elektrodę kalomelową (SCE), natomiast elektrodę prądową stanowiła elektroda platynowa. Gniazdo mocowania próbek zostało odpowiednio zaprojektowane i wytworzone z teflonu, co przedstawiono na rys. 17.

Skojarzenie badawcze (rys. 17) stanowił nieruchomy trzpień dociskany stałą siłą wynoszącą 100 N do próbki. Testy przeprowadzono w ruchu posuwisto-zwrotnym o częstotliwości 1 Hz i długości skoku $400\text{ }\mu\text{m}$. Średnica trzpienia w miejscu kontaktu wynosiła 2 mm . Testy przeprowadzono w środowisku roztworu wodnego surowicy. Każdy test podzielony został na trzy fazy: pierwsza, trwająca 5400 s , gdy nieruchoma odciążona próbka zanurzona jest w medium smarującym; druga, gdy uruchomiony jest fretting na 3600 s ; trzecia, gdy fretting zostaje zatrzymany, a skojarzenie badawcze odciążone (rys. 17b).

potentiostat. The test (working) electrode was a sample of the tested biomaterial placed in a special socket in such a way that the surface exposed to the corrosive environment was 1 cm^2 . As the reference electrode, a saturated calomel electrode (SCE) was used, while the electrode was a platinum one. The sample mounting socket was appropriately redesigned and made of Teflon, as shown in Fig. 17.

The tribosystem (Fig. 17) was a fixed pin pressed with a constant force of 100 N per sample. The tests were carried out in reciprocating motion with a frequency of 1 Hz and a stroke length of $400\text{ }\mu\text{m}$. The diameter of the pin at the contact point was 2 mm . The tests were carried out in a serum aqueous solution. Each test was divided into three phases. The first, 5400 s , when a stationary unloaded sample is immersed in the lubricant. The second is when fretting is started at 3600 s . The third when fretting is stopped and the tribosystem is balanced (Fig. 17b).



Rys. 17. a) Układ do badań fretting-korozji (tester tribologiczny T-17 oraz potencjostat SP-150),
b) Przykład wyników badań wraz z przedstawieniem wyznaczanych wartości [9]

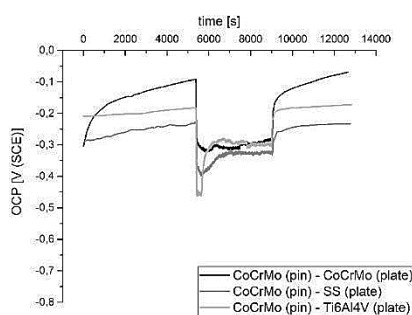
Fig. 17. a) system for fretting-corrosion tests (T-17 tribological tester and SP-150 potentiostat),
b) example of test results together with presentation of determined values [9]

Analiza otrzymanych wyników badań (rys. 17–18) pozwoliła wysunąć wnioski, że pary trące wykazywały wzrost napięcia anodowego w pierwszym etapie testu – przed aktywacją procesu fret-

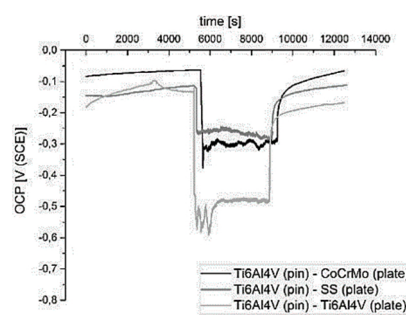
Analysis of the obtained test results (Fig. 17–18) allowed the authors to conclude that the friction pairs showed an anode voltage increase in the first test stage – before activating the fretting

tingu, co sugeruje pogrubienie pasywnej warstwy ochronnej. Po 90 minutach stabilizacji rozpoczęto proces tarcia frettingowego, który doprowadził do zniszczenia ochronnej warstwy tlenkowej. Nastąpił gwałtowny spadek wartości potencjału korozyjnego. W pierwszej fazie frettingu spadek potencjału był znaczny, następnie stabilizował się przy pewnej wartości (CoCrMo – SS, CoCrMo – Ti6Al4V, Ti6Al4V – Ti6Al4V, SS (stal nierdzewna M30NW) – CoCrMo, SS – Ti6Al4V), sugerując znaczącą depolaryzację podczas aktywacji frettingu dla pozostałych par. Fluktuacje wartości potencjału obwodu otwartego (OCP) podczas frettingu wskazują na naprzemiennie występowanie zjawiska depasywacji i repasywacji. Na tym etapie wartość potencjału została ustalona, co spowodowane jest wystąpieniem równowagi pomiędzy procesami pasywacji i depasywacji podczas frettingu. W przypadku niektórych par materiałowych (Ti6Al4V – SS, SS – CoCrMo, SS1.4441 (stal nierdzewna 316LVM) – SS 1.4441) przebieg zmian potencjału podczas frettingu jest malejący, co wskazuje na przewagę procesu depasywacji nad repasywacją. Po 60 minutach tarcie jest wyłączane, warstwa tlenkowa jest odbudowywana, a potencjał wzrasta do wartości wstępnej przed frettingiem. Zniszczona warstwa tlenku w niektórych przypadkach nie jest całkowicie odbudowywana. Jest to szczególnie widoczne w przypadku par trących, w których zarówno dysk, jak i pin wykonane były ze stopu Ti6Al4V, a także SS 1.4441 (pin) – SS 1.4441 (płytką). Potwierdzają to niższe wartości potencjału otwartego obwodu na końcu testu (po repasywacji) niż po pierwszej fazie testu (pasywacja). Jest oczywiste, że interakcje tlenków, mechaniczne i elektrochemiczne, zależą od składu chemicznego i struktury tlenków na powierzchni i ich wzajemnego oddziaływania (rys. 18).

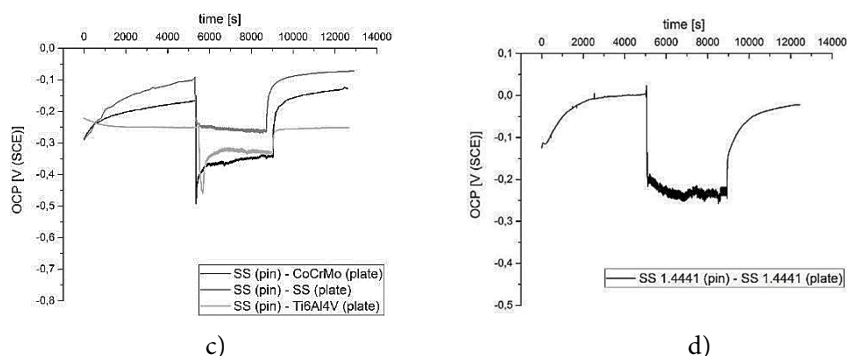
process, which suggests thickening of the passive protective layer. After 90 minutes of stabilization, the fretting friction process was initiated, which led to destruction of the protective oxide layer. The corrosion potential dropped sharply. In the first phase of fretting the potential decrease was significant, then it stabilized at a certain value (CoCrMo – SS, CoCrMo – Ti6Al4V, Ti6Al4V – Ti6Al4V, SS (M30NW stainless steel) – CoCrMo, SS – Ti6Al4V), suggesting significant depolarization during fretting activation for the remaining pairs. The open circuit potential (OCP) fluctuations during fretting indicate the alternating occurrence of depassivation and repassivation. At this stage, the potential value was determined, which is caused by a balance between the processes of passivation and depassivation during fretting. In the case of some material pairs (Ti6Al4V – SS, SS – CoCrMo, SS1.4441 (stainless steel 316LVM) – SS 1.4441) the course of potential changes during fretting is decreasing, which indicates the superiority of the process of depassivation over repassivation. After 60 minutes, the friction is switched off, the oxide layer is rebuilt and the potential increases to the initial value before fretting. The damaged oxide layer is in some cases not completely rebuilt. This is particularly evident in the case of the friction pairs in which both the disc and pin were made of Ti6Al4V alloy, as well as the SS 1.4441 (pin) – SS 1.4441 (disc). This is confirmed by the lower open circuit potential at the end of the test (after repassivation) than after the first test phase (passivation). It is obvious that the interactions of oxides, mechanical and electrochemical, depend on the chemical composition and structure of oxides on the surface and their interaction (Fig. 18).



a)



b)



Rys. 18. Zmiany wartości potencjału obwodu otwartego w trakcie całego testu dla następujących materiałów:
a) – CoCrMo pin; b) – Ti6Al4V pin; c) – SS pin; d) – SS 1.4441 pin [7]

Fig. 18. Changes in open circuit potential during whole test for following materials:

a) – CoCrMo pin; b) – Ti6Al4V pin; c) – SS pin; d) – SS 1.4441 pin [7]

Zakres zmian wartości potencjału obwodu otwartego (ΔE) podczas frettingu różni się dla poszczególnych kombinacji materiałów. Najmniejsze wartości dotyczyły par CoCrMo (pin) – CoCrMo (dysk), Ti6Al4V (pin) – SS (dysk) i SS (pin) – SS (dyski), co wskazuje na niewielkie wahania potencjału obwodu otwartego podczas frettingu. Wartości potencjału obwodu otwartego przedstawiono w tab. 2.

The range of changes in the open circuit potential (ΔE) during fretting differs for each material combination. The smallest values were related to CoCrMo (pin) – CoCrMo (disc), Ti6Al4V (pin) – SS (disc) and SS (pin) – SS (disc) pairs, which indicates slight fluctuations in the open circuit potential during fretting. The open circuit potential values are shown in Tab. 2.

Tab. 2. Wartości parametrów potencjału dla poszczególnych par trących

Tab. 2. Values of potential parameters for individual friction pairs

Połączenia materiałowe / Material combinations	E_{gap}	E_{avg}	ΔE	E_{rec}
CoCrMo(pin) – CoCrMo(plytka / plate)	0,18005	-0,3071	0,0478	0,2132
CoCrMo(pin) – SS(plytka / plate)	0,13755	-0,3961	0,0838	0,2629
CoCrMo(pin) – Ti6Al4V(plytka / plate)	0,26097	-0,3182	0,1632	0,1172
SS(pin) – CoCrMo(plytka / plate)	0,28309	-0,3400	0,0847	0,2316
SS(pin) – SS(plytka / plate)	0,19889	-0,2560	0,0357	0,1939
SS(pin) – Ti6Al4V(plytka / plate)	0,13381	-0,4462	0,2499	0,2529
Ti6Al4V(pin) – CoCrMo(plytka / plate)	0,19855	-0,2839	0,1015	0,2598
Ti6Al4V(pin) – SS(plytka / plate)	0,17899	-0,3217	0,04263	0,1869
Ti6Al4V(pin) – Ti6Al4V(plytka / plate)	0,31539	-0,4896	0,1576	0,2754
SS 1.4441 (pin) – SS 1.4441(plytka / plate)	0,25677	-0,2328	0,13061	0,2259

* zakres zmian wartości potencjału obwodu otwartego (E_{gap}), średnia wartość potencjału w czasie frettingu (E_{avg}), zmiana wartości potencjału obwodu otwartego ΔE w trakcie frettingu, zmiana wartości potencjału obwodu otwartego E_{rec} po wyłączeniu frettingu
* range of changes in open circuit potential (E_{gap}), mean value of potential during fretting (E_{avg}), change in open circuit potential ΔE during fretting, change in open circuit potential value of E_{rec} after turning off fretting

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań sformułowano następujące wnioski:
– najlepszą odporność na korozję frettingową w surowicy bydlęcej wykazuje para SS (pin) – Ti6Al4V (plytka) (najniższy E_{gap});

Based on the analysis of the research results, the following conclusions were made:

– the best resistance to fretting corrosion in bovine serum is shown by the pair SS (pin) – Ti6Al4V (disc) (the lowest E_{gap});

- podczas frettingu zanotowano najniższe średnie wartości potencjału obwodu otwartego dla par SS (pin) – Ti6Al4V (płytką) i Ti6Al4V – Ti6Al4V.
- po zakończeniu procesu frettingu proces repasywacji dla większości par jest zakończony; wyjątkiem są pary wykonane ze stopu Ti6Al4V – Ti6Al4V i SS 1.4441 – SS 1.4441.

Otrzymane wyniki badań wskazują, że większą odpornością na korozję frettingową dla par typu metal–metal charakteryzuje się SS (pin) – Ti6Al4V (płytką).

7. TESTY TARCIOWO-ZUŻYCIOWE IMPLANTÓW REFERENCYJNYCH Z ZASTOSOWANIEM SYMULATORA SBT-01.2

W ramach realizacji zadania dotyczącego przeprowadzenia testów tarciovo-zużyciowych implantów referencyjnych z zastosowaniem symulatora w ŁUKASIEWICZU – INOP zaprojektowano i zbudowano symulator stawu biodrowego (rys. 19), który spełnia wymogi normy ISO 14242-1 [7]. Najważniejsze parametry pracy symulatora podczas wykonywania testów to (rys. 20): liczba cykli dla jednego testu – 5 mln, zakres kątowy – zgodnie z normą ISO 14242-1, obciążenie zmienne – zgodne z normą ISO 14242-1, maksymalne chwilowe obciążenie normalne – 3 kN, częstotliwość ruchu – 1 Hz.

- during fretting, the lowest average values of open circuit potential were recorded for the SS (pin) – Ti6Al4V (plate) and Ti6Al4V – Ti6Al4V pairs;
- after the fretting process, the repassing process for most couples is completed; the only exceptions are the pairs made of Ti6Al4V – Ti6Al4V and SS 1.4441 – SS 1.4441.

The obtained test results indicate that the higher fretting corrosion resistance for a metal–metal pair is characterized by SS (pin) – Ti6Al4V (plate).

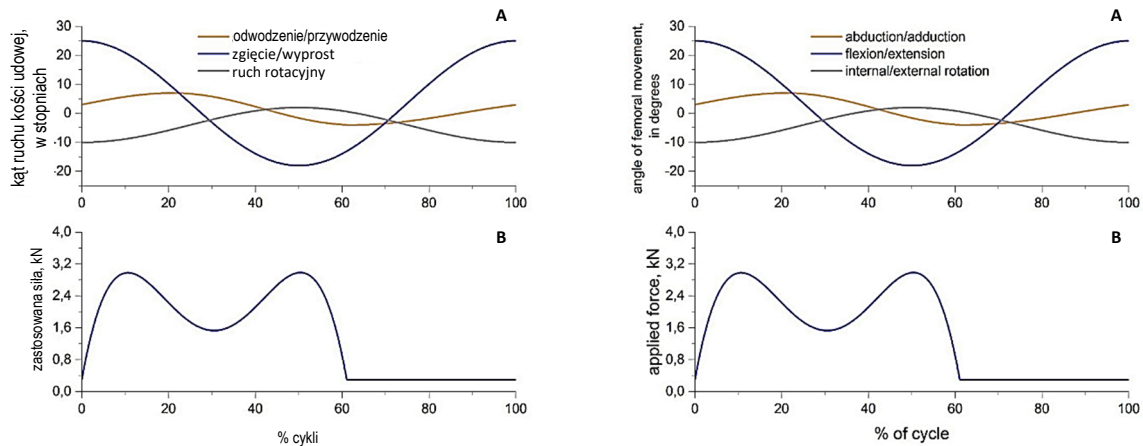
7. FRICTION AND WEAR TESTS OF REFERENCE IMPLANTS USING SBT-01.2 SIMULATOR

As part of the task on carry out friction and wear tests reference implants using hip simulator in ŁUKASIEWICZ – INOP, which was designed and was built (Fig. 19). Simulator meets the requirements of the standard ISO 14242-1 [7]. The most important work parameters simulator while performing tests on it (Fig. 20): number of cycles for one test – 5 million, angle range – in accordance with ISO 14242-1, variable load – in accordance with ISO 14242-1, maximum instantaneous normal load – 3 kN, traffic frequency – 1 Hz.



Rys. 19. Symulator ruchu stawu biodrowego SBT-01.02, schemat ogólny

Fig. 19. SBT-01.02 hip joint motion simulator, general diagram



Rys. 20. Wykresy zmienności w czasie: a) ruchów kątowych komponentu udowego, b) wartości siły obciążającej [4]

Fig. 20. Plots of variation over time: a) angular movements of femoral component, b) loading force values [4]

Przedmiotem badań były trzy komplety endoprotezy stawu biodrowego składające się z następujących elementów: głowy ze stali nierdzewnej FeCrNiMnMoNb 28 mm oraz wkładki z PE-UHMW (ISO 5834-1 + 2). Panewki przeznaczone do badań tarciowo-zużyciowych zostały wstępnie namoczone w medium smarującym (surowicy bydlęcej), celem zminimalizowania efektu sorpcji płynów w trakcie testu i wpływu tego zjawiska na określenie właściwego zużycia materiału. Panewki przygotowano do testów zgodnie z normą ISO 14242. Testy przeprowadzone były w temperaturze $37 \pm 2^\circ\text{C}$. Do podgrzania surowicy bydlęcej zastosowano termostat laboratoryjny, z którego ciecz podawana była do gniazda mocowania endoprotezy za pomocą pompy perystaltycznej.

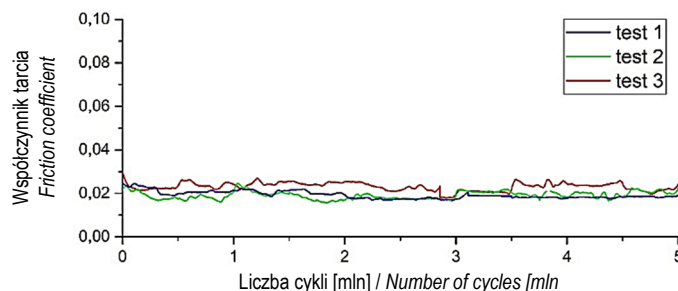
Celem precyzyjnego określenia ubytku masy panewki polietylenowej zastosowano tzw. grupę kontrolną, którą stanowiła panewka polietylenowa poddana wstępnemu namaczaniu, tak jak wkładki do badań tribologicznych. Panewka z grupy kontrolnej poddawana była naciskom zgodnie z normą ISO 14242-2 [6]. Liczba nacisków wynosiła $5 \cdot 10^6$ z częstotliwością 1 Hz. Panewka grupy kontrolnej była poddawana takim samym procedurom dotyczącym wymiany medium smarującego oraz kontroli masy, jak panewki do badań tribologicznych. Uwzględnienie przyrostu masy grupy kontrolnej spowodowanego pochłanianiem medium smarującego

The subject of the research was three sets of hip joint endoprostheses consisting of the following elements: a stainless steel FeCrNiMnMoNb 28 mm head and of UHMWPE inserts (ISO 5834-1 + 2). The acetabular cups intended for friction and wear tests were pre-soaked in a lubricating medium (bovine serum) to minimize the effect of liquid sorption during the test and the effect of this phenomenon on determining the proper material wear. The acetabular cups were prepared for testing in accordance with ISO 14242. The tests were carried out at $37 \pm 2^\circ\text{C}$. A laboratory thermostat was used to heat the bovine serum, from which the liquid was delivered to the endoprosthesis clamping socket using a peristaltic pump.

The purpose of precisely defining the weight loss of a polyethylene acetabular cup was to use a so-called control group, which was a polyethylene acetabular cup subjected to pre-soaking, as well as inserts for tribological tests. The control acetabular cup was subjected to motions in accordance with ISO 14242-2 [6]. The number of motions was $5 \cdot 10^6$ with a frequency of 1 Hz. The control acetabular cup was subjected to the same procedures regarding the exchange of lubricating medium and mass control as the acetabular cup for the tribological tests. Taking into account the increase in the mass of the control group caused by the absorption of lubricating medium by the

przez polietylen umożliwia określenie dokładnej wartości zużycia panewek poddanych badaniom tribologicznym.

polyethylene enables one to determine the exact value of wear of the acetabular cups subjected to the tribological tests.

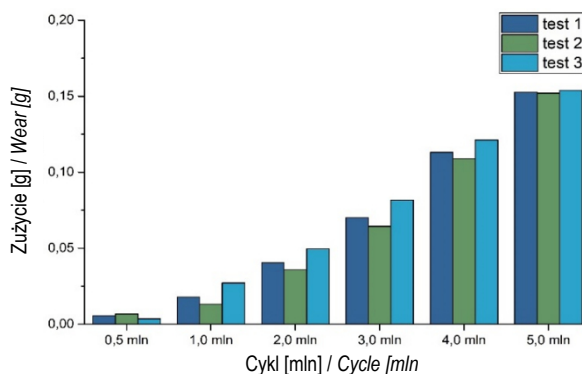


Rys. 21. Zmiany współczynnika tarcia dla testów przeprowadzonych z wykorzystaniem symulatora SBT 01.2 [4]

Fig. 21. Changes in coefficient of friction for tests carried out using SBT 01.2 simulator [4]

Na podstawie otrzymanych wyników badań przedstawionych na rys. 21 można stwierdzić, że przebieg zmian wartości współczynnika tarcia w funkcji ilości przepracowanych cykli był powtarzalny dla wszystkich trzech testów i zawierał się w przedziale od około 0,021 do 0,023. Uzyskane wartości współczynnika tarcia odpowiadają wartościom podanym w dostępnej literaturze [4].

Based on the results of the tests presented in Fig. 21, it can be concluded that the course of changes in the coefficient of friction as a function of the number of cycles worked was reproducible for all three tests and ranged from about 0.021 to 0.023. The obtained coefficient of friction values correspond to the values given in the available literature [4].



Rys. 22. Zużycie wkładki polietylenowej PE-UHMW

Fig. 22. Wear of UHMWPE insert

Na podstawie przeprowadzonych badań tribologicznych wyznaczona została wartość zużycia masowego panewek polietylenowych w funkcji ilości przepracowanych cykli (rys. 22). Wartość zużycia masowego wzrasta ze wzrostem liczby cykli. Zwiększające się zużycie polimerowej wkładki podczas testu jest typowym zachowaniem nieusieciowanego polietylenu PE-UHMW. Oznacza to, że proces zużywania stanowi stały i ciągły mechanizm podczas całego czasu pracy

On the basis of the tribological tests carried out, the value of mass wear of polyethylene acetabular cups as a function of the number of cycles worked was determined (Fig. 22). The value of mass wear increases with the increasing number of cycles. The increasing wear of the polymer liner during the test is a typical behavior of UHMWPE. This means that the wear process is a constant and continuous mechanism during

i jest rezultatem powstawania zmian o charakterze plastycznym.

W ramach realizowanego projektu przeprowadzono badania materiałów referencyjnych, określono mechaniczne, tribologiczne oraz korozyjne właściwości badanych materiałów. We współpracy z partnerami przeprowadzono szereg testów biogodności oraz biokompatybilności nowych materiałów wytypowanych przez firmę Mathys. Dane zgromadzone w ramach realizowanego projektu posłużyły do zbudowania bazy informacji o materiałach referencyjnych i prototypowych w zastosowaniach ortopedycznych.

8. PODSUMOWANIE

Sukcesy i osiągnięcia są wspólnym dziełem i efektem zespołowego działania przemysłu i jednostek naukowych. Dzięki dużej aktywności, zaangażowaniu i wysokim kwalifikacjom kadry pracowniczej generowane są nowe innowacyjne technologie, które odpowiadają na zapotrzebowania przemysłu. Szeroka współpraca z przemysłem oraz efekty tej współpracy mają duży wpływ na rozwój gospodarki. Proponowane i wdrażane w życie rozwiązania wpisują się strategię Europy 2020, w której stawia się na inteligentny rozwój, tj. gospodarkę opartą na wiedzy i innowacji oraz rozwój zrównoważony: poprzez wspieranie gospodarki efektywniej korzystającej z zasobów, bardziej przyjaznej środowisku i bardziej konkurencyjnej.

PODZIĘKOWANIE

Przedstawione wyniki badań były realizowane w ramach projektów:

- „Nowa generacja łożysk pracujących w ekstremalnych warunkach stosowanych w przemyśle lotniczym” o akronimie Berings; projekt realizowany w ramach 6 Programu Ramowego w latach 2009–2012;
- „Wprowadzanie cząstek smarów stałych na powierzchnie współpracujących tribologicznie części pracujących w podwyższonych temperaturach” o akronimie Higraph; projekt realizowany w ramach 7 Programu Ramowego w latach 2013–2015;

the entire working time and is the result of plastic changes.

As part of the project, reference materials were tested, and the mechanical, tribological and corrosive properties of the materials tested were determined. In cooperation with partners, a series of biocompliance and biocompatibility tests of new materials selected by the Mathys company were carried out. Data collected as part of the implemented project served to build a database of information on reference and prototype materials in orthopedic applications.

8. PODSUMOWANIE

Successes and achievements are a joint effort and the effect of the collective activity of industry and scientific units. Thanks to the high levels of activity, commitment and high qualifications of the employees, new innovative technologies are generated that meet the needs of industry. Wide cooperation with industry and the effects of this cooperation have an enormous impact on the development of the economy. The proposed and implemented solutions are in line with the Europe 2020 strategy, which focuses on smart development, i.e. an economy based on knowledge and innovation, sustainable development: by supporting a more resource-efficient, more environmentally friendly and more competitive economy.

ACKNOWLEDGEMENTS

The presented research results were obtained as part of projects:

- *“A new generation of bearings working in extreme conditions used in the aviation industry” with the acronym Berings; project executed under the 6th Framework Program in 2009–2012;*
- *“Introduction of solid lubricant particles to surfaces of tribologically working parts working at elevated temperatures” with the acronym Higraph; project executed under the 7th Framework Program in 2013–2015;*

- „Charakterystyka zmian parametrów mechanicznych i strukturalnych biomateriałów w przebiegu zużycia endoprotez stawu biodrowego”; projekt realizowany w ramach konkursu SONATA NCN w latach 2013–2016;
- „Nowe rozwiązania w opracowaniu hipoalergicznego materiału na implanty ortopedyczne: kroki ku spersonalizowanej medycynie” o akronimie HypOrth; projekt realizowany w ramach 7 Programu Ramowego w latach 2014–2018.

LITERATURA

- [1] Lijewski M., V. Leshchynsky. 2015. „Impregnacja smarami stałymi i zastosowanie wysokotemperaturowych części proszkowych”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVI* (2): 133–146.
- [2] Sulej-Chojnacka J., V. Leshchynsky, M. Lijewski, S. Ziółkiewicz. 2014. „Ocena i analiza impregnowanych układów tribologicznych pracujących w podwyższonych temperaturach”. *Tribologia* 4: 113–123.
- [3] Wiśniewska-Weinert H. 2012. „Kompozyty z siarczkowymi nanocząsteczkami grafenopodobnymi”. *Open Access Library* 2 (15): 1-184.
- [4] Wiśniewski T., A. Wielowiejska-Giertuga, R. Rubach, Ł. Łapaj, J. Magda. 2018. „Badania tribologiczne endoprotez stawu biodrowego o skojarzeniu polietylen-metal na symulatorze stawu biodrowego”. *Tribologia* 5: 153–158.
- [5] ASTM F732: Wear Testing of Polymeric Materials Used in Total Joint Prostheses.
- [6] ISO 14242: Implants for surgery - Wear of total hip-joint prostheses. Part 1: Loading and displacement parameters for wear-testing machines and corresponding environmental conditions for test.
- [7] Wielowiejska-Giertuga A., M. Miler, J. Sulej-Chojnacka. 2016. „Badania tarciowo-zużyciowe skojarzeń materiałowych typu metal-polimer znajdujących zastosowanie w implantach ortopedycznych”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVII* (1): 73–82.
- [8] Wielowiejska-Giertuga A., T. Wiśniewski, R. Rubach. 2018. „Badania fretting korozji materiałów stosowanych na elementy endoprotez stawu biodrowego”. *Tribologia* 5: 143–151.
- [9] (ISO 14242-2:2012) Implants for surgery - Wear of total hip-joint prostheses -- Part 2: Methods of measurement.
- [10] Saikko V. 1992. “A simulator study of friction in total replacement hip joints”. *Proc. Inst. Mech. Engrs.* 206: 201–211.

REFERENCES

- [1] Lijewski M., V. Leshchynsky. 2015. „Impregnacja smarami stałymi i zastosowanie wysokotemperaturowych części proszkowych”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVI* (2): 133–146.
- [2] Sulej-Chojnacka J., V. Leshchynsky, M. Lijewski, S. Ziółkiewicz. 2014. „Ocena i analiza impregnowanych układów tribologicznych pracujących w podwyższonych temperaturach”. *Tribologia* 4: 113–123.
- [3] Wiśniewska-Weinert H. 2012. „Kompozyty z siarczkowymi nanocząsteczkami grafenopodobnymi”. *Open Access Library* 2 (15): 1-184.
- [4] Wiśniewski T., A. Wielowiejska-Giertuga, R. Rubach, Ł. Łapaj, J. Magda. 2018. „Badania tribologiczne endoprotez stawu biodrowego o skojarzeniu polietylen-metal na symulatorze stawu biodrowego”. *Tribologia* 5: 153–158.
- [5] ASTM F732: Wear Testing of Polymeric Materials Used in Total Joint Prostheses.
- [6] ISO 14242: Implants for surgery - Wear of total hip-joint prostheses. Part 1: Loading and displacement parameters for wear-testing machines and corresponding environmental conditions for test.
- [7] Wielowiejska-Giertuga A., M. Miler, J. Sulej-Chojnacka. 2016. „Badania tarciowo-zużyciowe skojarzeń materiałowych typu metal-polimer znajdujących zastosowanie w implantach ortopedycznych”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVII* (1): 73–82.
- [8] Wielowiejska-Giertuga A., T. Wiśniewski, R. Rubach. 2018. „Badania fretting korozji materiałów stosowanych na elementy endoprotez stawu biodrowego”. *Tribologia* 5: 143–151.
- [9] (ISO 14242-2:2012) Implants for surgery - Wear of total hip-joint prostheses -- Part 2: Methods of measurement.
- [10] Saikko V. 1992. “A simulator study of friction in total replacement hip joints”. *Proc. Inst. Mech. Engrs.* 206: 201–211.